

塩害補修工事の施工・管理手法

— 小余綾高架橋 —

東京土木支店	PC工事部	本間 元
東京土木支店	開発営業部	藤本晋矢
東京土木支店	PC工事部	伊藤智之

概要:小余綾高架橋は、国道1号線西湘バイパスにかかる多径間のPCT桁橋である。本工事は、海岸線からの飛来塩分により塩害を受けた桁および床版を電気化学的脱塩によって補修しており、ここでは工事を行った結果を報告するとともに、脱塩に関する調査・管理手法を紹介する。

Key Words: 電気化学的脱塩、脱塩モニタリング、パネル方式、ファイバー方式、表面被覆

1. はじめに

本工事は、昭和40年に完成した一般国道1号西湘バイパスにかかる多径間のPCT桁橋の補修工事である。本橋は海岸線からの距離が短く（写真-1）、海からの飛来塩分の影響により建設後十数年で塩害劣化が見受けられるようになり、過去に断面修復工法や表面被覆工法などの補修工事を実施している。しかし補修後には、コンクリート中の内在塩分による未補修部からの塩害劣化が再び発生したため、本工事では内在塩分の除去を目的とした根本的な補修として断面修復工、電気化学的脱塩工、表面被覆工を施工した。本稿では、調査項目を踏まえて、電気化学的脱塩工法の施工管理における判定基準を明確化している。本論文は初期調査、損傷部取壊し、脱塩管理手法、表面被覆の管理について報告する。



写真-1 全体写真

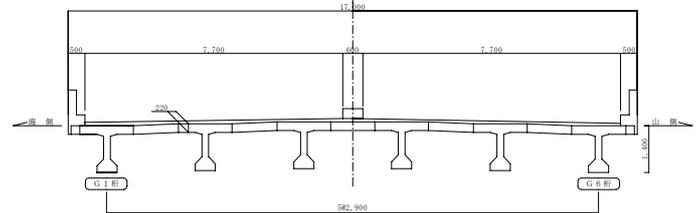


図-1 一般断面図

2. 工事概要

2.1 橋梁概要と過去の補修履歴

概要・補修履歴を以下に、主桁断面図を図-1に、着手前写真を写真-2に示す。

橋梁名：小余綾高架橋（こゆるぎ）

所轄：国土交通省 関東地方整備局 横浜国道事務所



本間元



藤本晋矢



伊藤智之

工事位置：神奈川県中郡大磯町大磯地内～東小磯地内

構造形式：単純ポストテンション方式 PCT 桁橋

完成年度：1965年

橋長：1,099m (50径間)

支間長：20.0m

施工区間：第48径間，第49径間

工期：平成17年 3月 2日

～平成18年 6月 30日

工種：断面修復工 144.5m²

電気化学的脱塩工 1,117m²

表面被覆工 1,528m²

補修履歴：1984年 断面修復，表面被覆工法

1994年 断面修復，表面被覆工法



写真-2 着工前状況

3. 施工工種と工事概要

本工事で行った工種と調査管理項目を表-1に示す。

表-1 工種別調査・管理項目一覧

工種	調査・管理項目	目的	調査方法・管理方法
調査工	A. 外観調査 たたき調査1	コンクリートの浮き，剥離，および塗装面のひび割れを調査する。	マーキング，数量算出，全断面測定
	B. 塩化物イオン濃度 調査1	脱塩前の塩分量測定を行う。	JCI-SC4 φ75のコア採取 電位差適定法
	C. アルカリ骨材反応 性試験	アルカリ化により骨材の異常膨張が生じないかを調査する。	カナダ法，14日間で膨張率0.1%以下になるかを判定。 (模擬脱塩で脱塩に使用する電流を流し判定)
表面被覆 除去工	D. 外観調査・たたき 調査2	コンクリートの浮き，剥離，ひび割れを調査し，断面修復範囲を決定する。	マーキング，数量算出
損傷部 取壊工	E. はつり調査	PC鋼材部の腐食状況を調査する。	目視により劣化状況を判断し，構造安全性を検討する。
	F. かぶり調査	鉄筋位置の塩分を測定するために，かぶり調査を行う。	RCレーダーを使用し，床版全体のかぶりを測定する。
	G. 外観調査・たたき 調査3	健全部の再確認を目的とする。	新たな変状を発見した場合，断面修復範囲に追加する。
	H. pH測定1	脱塩前のpH値を測定する。(鋼材周辺のアルカリ性)	ドリルで鉄筋近傍まで削孔し，霧吹きで湿らせた後，pH試験紙で測定する。
	I. 中性化深さ調査	脱塩範囲外となっている床版部の中性化深さを調査する。	塩分含有量調査1で採取した資料にフェノールフタレイン液を噴霧し，中性化深さを測定する。
	①たわみ管理	はつり前後の桁の変動を経時的に測定する。	主桁の鉛直変位を確認し，はつり前の状態から0～5mmまでの管理とする。
	②出来形管理	断面修復範囲と実際に切削した範囲を確認する。	マーキング寸法以上の管理
下地処理工	③コンクリート表面・鉄筋錆管理	断面修復前の補修部コンクリート表面や，鉄筋の腐食状況を管理する。	コンクリート面は目視により粗面仕上げを確認，鋼材はISO規格のブラスト仕上げSa2以上とする。
犠牲陽極材・照合電極設置工	④鋼材抵抗値測定	脱塩に必要な導通が確実に行われるため鉄筋の抵抗値を測定する。	抵抗値が0.3Ω以下になるよう管理する。
断面修復工	⑤鋼材復旧管理	損傷の激しい鉄筋や破断した鉄筋の復旧を目的とする。	破断した鉄筋は添え筋を施す。既設コンクリート界面部の鉄筋に亜硝酸リチウムを塗布する。
	⑥日常管理試験	断面修復に使用する材料の品質を施工日毎に管理する。	外気温4～25℃，練り上がり温度5～35℃，圧縮強度はσ28=40N/mm ² ，付着強度はσ28=1.5N/mm ²

電気化学的脱塩工	J. 塩化物イオン濃度調査 2	脱塩中の塩分量測定を行う。	2週間毎にφ10のドリルで資料を採取し、電位差滴定法にて塩分量を測定。
	K. pH測定 2	脱塩後のpH値を測定する。(鋼材のアルカリ性回復度)	ドリルで鉄筋近傍まで削孔し、霧吹きで湿らせた後、pH試験紙で測定する。
	L. 塩化物イオン濃度調査 3	脱塩後の塩分量測定を行う。	φ75のコアを採取し、JCI-SC4に準じて脱塩率が70%以上、かつ塩化物含有量2.5kg/m ³ 以下とする。
	⑦電流密度管理	脱塩中に所定の電流量が確保されているかを管理する。	通電期間12週間を目標に1.5A/m ² ±20%で管理する。
	⑧脱塩量管理	パネル方式による塩化物イオンの流出を定期的に測定し脱塩量を算出する。	2週間毎に資料を採取し、室内にて塩分量を測定。1週間毎に簡易的に現場にて塩分量を測定。
表面被覆工	M. 付着強度試験	表面被覆とコンクリートとの付着性を確認する。	付着強度 1.5N/mm ² 以上
	N. 各層簡易塩分量測定	表面被覆に付着する飛来塩分量を測定する。	北川式ガーゼ法により塩分量を測定する。
	O. 外観調査	ピンホール、膨れ、はがれ等がないことを確認する。	欠陥が発見された場合は、塗装をはがし再度被覆を行う。
	⑨膜厚管理	表面被覆の膜厚を測定・管理する。	目標値を定めて、平均値および標準偏差により管理を行う。
	⑩水分量・温度・湿度管理	表面被覆施工時の雰囲気測定を行う。	外気温5℃以上、湿度は85%以下とし、表面水率8%以下であることを管理する。

上記の項目のうち、本工事で特に重要と思われる項目および工夫した点を以下で紹介する。

4. 調査・管理を踏まえた施工

(A) : アルカリ骨材反応性試験

使用骨材と電気化学的脱塩でコンクリート中の鋼材周辺に集積するアルカリ金属イオンとの反応により、骨材自体に膨張等がないかを確認するため、アルカリ骨材反応性試験(急速法=カナダ法)を実施した。判定基準は14日(当現場では28日)で膨張率が0.1%以下とし、コンクリートコア膨張性を確認した。(表-2, 写真-3)。この結果、電気化学的脱塩の施工に対し、アルカリ骨材反応の有害性は見られなかった。

表-2 アルカリ骨材反応性結果

名称	膨張率 (%)						
	開始	1日	3日	7日	14日	21日	28日
No.1 P47~P48	0.000	0.003	0.005	0.009	0.029	0.064	0.098
No.2 P48~P49	0.000	0.005	0.006	0.001	0.024	0.054	0.092



写真-3 試験判定

(B) 初期塩化物イオン濃度調査・かぶり厚測定、中性化深さ調査

電気化学的脱塩の事前調査として脱塩前の既設コンクリート内にどの程度の塩分が含まれているかを把握するため、コンクリートコアによる分析方法(JCI-SC4 電位差滴定法)を実施した。

結果を図-2に示す。なお、測定位置は、各桁海側ハンチ面と床版部のG1-G2, G3-G4, G5-G6間とした。

また損傷部の外観調査、たたき点検を実施した後、比較的損傷面積の多かった場所打ち床版部にてかぶり厚さ測定、中性化深さ測定、塩化物イオン濃度調査を行った。その結果、一部で高い濃度が検出されたため、当初は主桁、横桁のみが脱塩範囲であったが、新たに床版部も脱塩範囲に加えて施工を行った。(図-3)

塩化物イオン濃度分布図

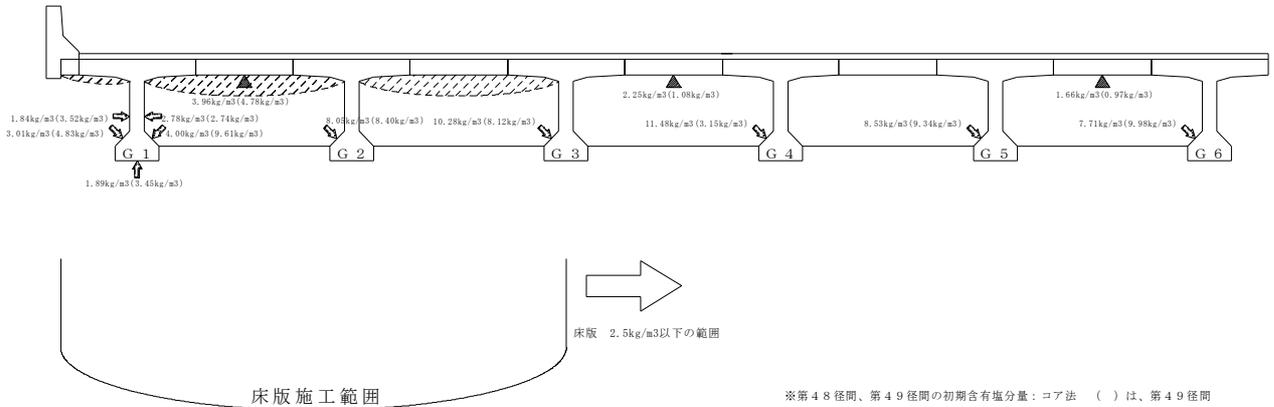


図-2 初期塩化物イオン分析結果

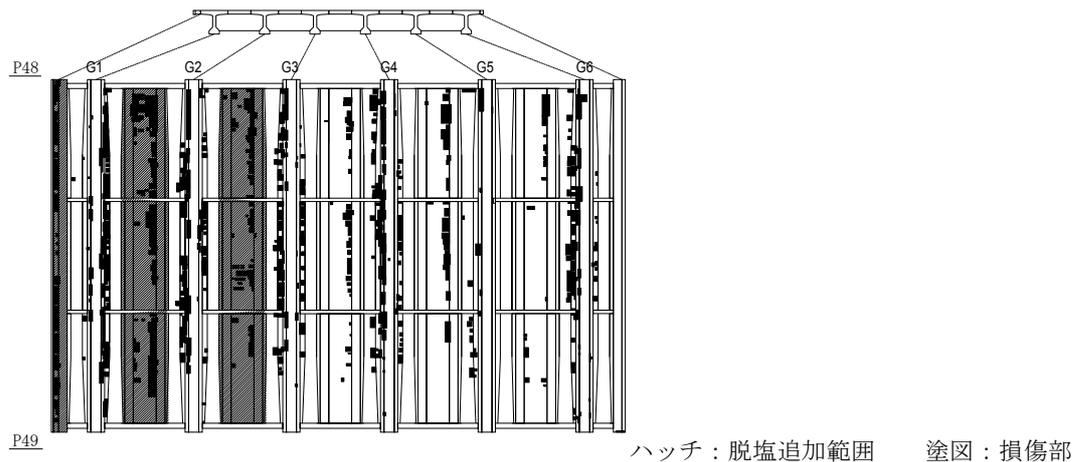


図-3 損傷展開図 (第49径間)

(C) 主桁はつり検討、たわみ量測定、鋼材損傷度調査

本構造物は、損傷部位が全体に点在し、箇所によっては損傷範囲が複雑かつ広範囲になっており、集中している箇所も多々見受けられた。今回、損傷部取壊しを行う前に復元設計を行い、主桁の曲げ応力度、せん断応力度、たわみ量の算定をして、構造的に問題とならないはつり深さ (t=70mm) 及びたわみ量(0~5mm そり方向)を算出し、たわみ量測定の基準とした。また床版部も同様に検討 (t=60mm) を行い施工した。(表-3、写真-4)

表-3 たわみ量測定結果 (第49径間)

損傷部取壊し後は、自重の低減、桁下縁部の断面欠損による PC 鋼材の偏心により表-3のように最大で 1.1mm 上方に反ったが、計算による許容値 (5mm) 以内であった。

施工日	1日目	3日目	5日目	7日目	9日目	10日目	備考
G1	0mm	0.1	0.3	0.2	0.8	0.6	0.6mm 上方そり
G2	0mm	0.1	0.6	0.7	0.7	1.0	1.0mm 上方そり
G3	0mm	0.6	0.3	0.6	0.5	0.8	0.8mm 上方そり
G4	0mm	0.4	0.3	0.5	0.9	1.1	1.1mm 上方そり
G5	0mm	0.4	0.4	0.7	0.9	1.2	1.2mm 上方そり
G6	0mm	0.1	0.3	0.5	0.5	0.8	0.8mm 上方そり

鋼材損傷度調査では、塩害によって本構造物の主要な材料であるPC鋼材に腐食が発生していないかを確認するため、1径間2箇所鋼材をはつり出してシーす内のグラウト充填状態や腐食状況を確認した。結果は、いずれの場所でも不具合は見受けられなかった。

(D) 断面修復, 自然電位測定, pH測定, 脱塩中塩化物イオン濃度測定, 電解質溶液分析, 電流密度管理

断面修復は、脱塩を行うために電気抵抗性が低く、かつ既設構造物との付着性のよい、ポリマーセメント系の材料を選定した。断面修復を行う前に、マクロセル腐食を防止するため、露出した鉄筋に犠牲陽極材を設置した。脱塩を開始するにあたり主桁（ウェブ、下床版）と横桁で露出している金具（セパレーター等）が、通電する上で障害となるため、撤去または絶縁処理を行った。さらに配線設備を取り付ける前に鉄筋に接続されているかを確認（導通検査）してから施工を行った。

自然電位の測定により、断面修復を行っていない箇所鋼材の腐食度が低いことを確認した。またpH測定は脱塩の前後でアルカリ性の回復を確認するため実施した。結果、脱塩施工前には鉄筋位置でpH=11.4程度のもので、脱塩を完了してからはpH13.6以上となった。（写真-5）

脱塩は、ファイバー方式で行い、脱塩中の含有塩化物イオン濃度測定は、通電期間12週間欠通電の内、1桁あたり3箇所をドリル法で採取した試料を2週間毎に分析した。脱塩効果としては、当初2径間最大11.48kg/m³あったコンクリート中の塩化物イオン濃度が12週間後は最大2.00kgf/m³と、85%程度塩分量が減少し、目標であった2.5kg/m³かつ施工前の70%以上の脱塩率の条件を通電期間内に完了することが出来た。（図-4）



写真-4 たわみ測定状況



写真-5 PH測定 (PH13.6以上)

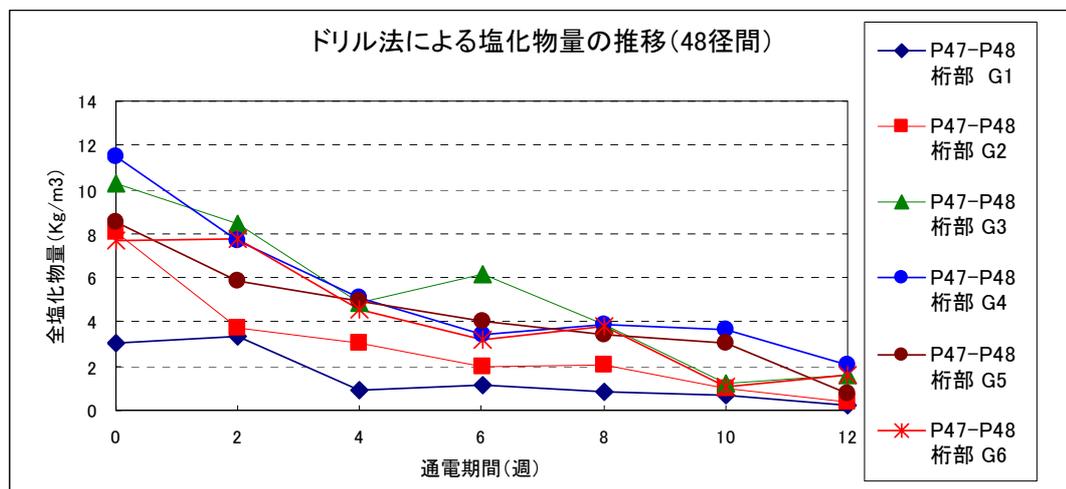


図-4 脱塩期間中の塩分分析結果 (第48径間)

また、本工事では別の管理手法として一部パネル枠を設置し、電解質溶液に溶解出した塩素イオン濃度をドリル法と同時に測定している。これは、通常行われているドリル法やコア法では、塩分測定のために新規に削孔する必要があり、既設構造物を痛めるだけでなく、測定結果のばらつきが以前から問題となっていたため、新規分析方法として提案したものである。この方法は、可溶性塩分のみ測定であるが、定点分析であり電気化学的脱塩により、随時塩分が抜け出していく様子を簡易測定法にてモニタリングすることが可能である。この結果、約5kg/m³程度の可溶性塩分が、確実にコンクリート中から抜けていることを確認した。

電流密度管理は、直流電源装置や各脱塩回路に設計通りの電流値(1.5A/m²)が流れているかを確認するために行った。毎週、クランプメーターを使用して確認した。(写真-6, 7, 8)

一般的に行われてきた電気化学的脱塩の通電は、約 1.0A/m² を 8 週間連続して行われるが、PC 構造物では、通電による PC 鋼材の水素脆化が懸念される。

そこで、本工事では、連続 5 日間/週の通電を行い、2 日間通電を休止することでの間欠通電を、延べ 12 週間実施した。この手法は、PC 鋼材の水素脆化を防止する有効な手段として一般的に利用される手法である。電流値は、1.0A/m² の電流密度で 18 週程度通電が必要になったという脱塩結果報告により、1.5A/m² の間欠通電を計画し、施工を行った。

電流密度の算出は、以下の計算により行った。

通電量と脱塩率の結果報告

毎週月曜日朝 8 時～金曜日 17 時までの断続通電とする。16h+24h×3日+17h=105h/週
月 火 水 木 金

径間名	積算電流量 (A・h/m ²)	脱塩率 %	脱塩率70%とした場合の電流量
44径間	2,152.5	79.4	1,897.7
45径間	2,257.5	85.9	1,839.6

≒ 1,900A・h/m²

よって

$$\frac{1900}{A \cdot h/m^2} \div \left(\frac{105}{h/週} \times \frac{12}{週} \right) = 1.5 \text{ A/m}^2$$
 これを管理値としている。

これにより、12 週間の間欠通電で目標の脱塩結果を得る事が出来た。



写真-6 電流管理 (直流電源)



写真-7 電流管理 (各回路)



写真-8 脱塩施工状況

(E) 水分、温湿度管理、簡易塩分量測定、附着強度試験、膜厚管理

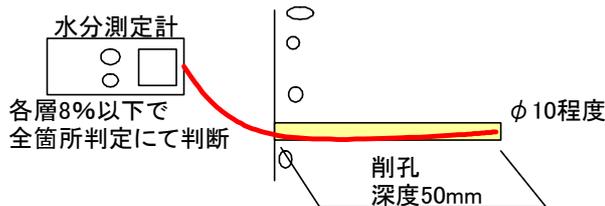


図-5 水分率測定概要図



写真-9 水分率測定状況

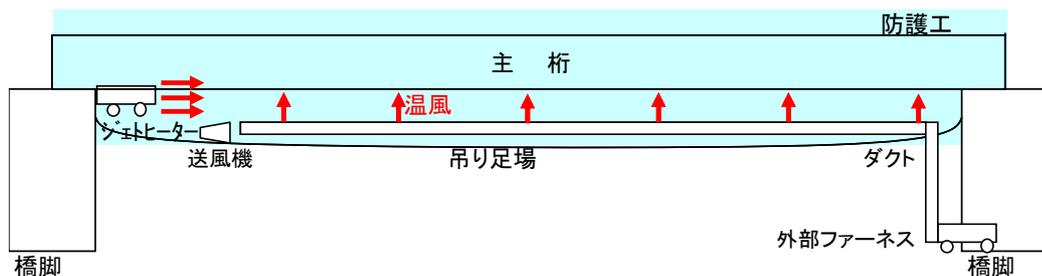


図-6 養生概要図

電気化学的脱塩終了後に解体及びコンクリート面の高圧洗浄を実施した。脱塩後は、脱塩で使用した電解質溶液が十分にコンクリート内に浸透していることが考えられた。この状態で表面被覆を行うと水分の気化により被覆面にふくれやはがれが生じる可能性があったため、表面被覆の施工を行う前に換気・保温養生を実施した。50mm 削孔し、各深度 (10mm おき) で塗装表面水分率の基準値 (8%) 以下になるまで、換気・保温を継続した。(図-5, 6 写真-9, 10) また、模擬試験体を作成し同条件にて通電施工の実施, 促進養生, 様々な塗装材を用いて状態の観察を行った。



写真-10 換気・保温養生

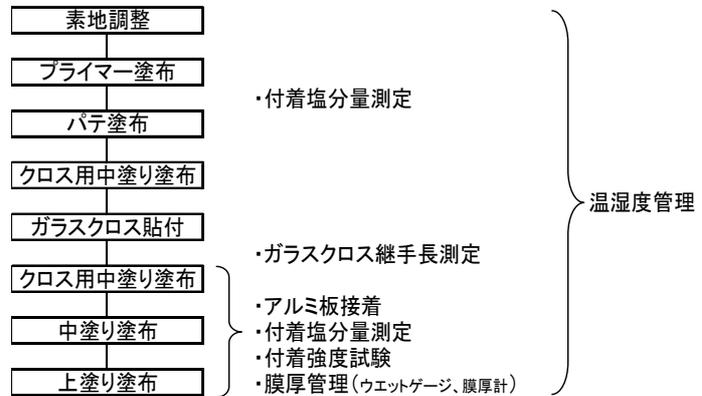


図-7 表面被覆工のフローチャート

表面被覆工 (図-7) は、コンクリート面の乾燥状態を確認後に開始した。仕様は、はく落に対する有機系被覆工法の塗布接着形シート工法を採用した。表面被覆開始時には、簡易的に飛来塩分をガーゼ法にて測定し、コンクリート表面に塩分が付着していないことを確認した。また日々の施工前確認として温湿度管理を実施した。冬季施工であったため、外気温度 5℃以下及び湿度 85%以上の条件と雨の日の施工は行わないこととした。

各層、施工日毎にコンクリート版供試体に塗装を行い、付着強度を建研式の付着強度試験機を用いて、付着性能を確認した。出来形管理は、膜厚管理を行い、施工中は、ウェットゲージを用いて管理した。施工後は、1 径間 764m² に対し、1.5 ロット 38 点の位置を定めて (通常 1 ロット 500m² : 25 点管理) アルミ板接着し、中塗り、上塗り各層毎の非磁性体用膜厚計を用いて確認した。(写真-11, 12)

4. おわりに

塩害環境下にある PC 構造物の補修は、耐久性、経済性を含め、発注段階と工事開始後の調査における設計や材料、工法の選定、施工・管理方法を再度十分に検討することが必要である。電気化学的脱塩の管理手法が完全には確立していないため、本論文で提案した手法は発展途上のものであるが、今後の同様な補修での管理手法の一つとして参考になれば幸いである。

謝辞

本橋補修工事が、無事故無災害で完成出来たのも、国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所、小田原出張所の皆様のご指導や貴重なアドバイスのおかげであり、関係各位に深く感謝致します。



写真-11 コンクリート付着塩分測定



写真-12 塗装膜厚測定